



PERÇİNLİ ÇELİK KÖPRÜ ELEMANLARININ YORULMA ÖMRÜ TESPİTİ ÇALIŞMALARI

¹Barlas Özden ÇAĞLAYAN, ²Hudai KAYA

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat mühendisliği Bölümü, İSTANBUL*

²*Orion Ağır Çelik Yapı Mühendisliği İnşaat Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, İSTANBUL*

¹caglayan@itu.edu.tr, ²hkaya@orionmuhendislik.com

(Geliş/Received: 13.06.2016; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.11.2016)

ÖZ: Çatlak veya çatlak benzeri süreksizlikler birçok mühendislik yapısında hasara neden olan önemli bir olgudur. Bu çatlakların oluşmaması için izlenecek yollardan en önemlisi boyutlandırma sırasında yorulma ile ilgili etkileri göz önüne almak, imalat sırasında da çatlak oluşumuna neden olabilecek detay ve işçilik hatalarından kaçınmaktır. Ayrıca servis hayatı boyunca periyodik olarak yapının muayene edilmesi de gerekmektedir. Buna rağmen, çatlak veya çatlak benzeri süreksizliklerin oluşumu kaçınılmazdır. Bunların varlığını gevrek kırılma ve yorulma açısından değerlendirmek, mühendislerin sorumluluğundadır. 1856 -1866 yılları arasında İzmir Aydın, 1865 yılında İzmir Turgutlu-Afyon, 1873 Haydarpaşa-İzmit, 1888 İstanbul-Edirne, Kırklareli-Alpullu hatlarının yapılmasıyla Türkiye perçinli çelik demiryolu köprüleri ile tanışmıştır. Yapım yılları dikkate alındığında bu köprülerin 100 yaşının üzerinde olduğu, sürekli dinamik yüklere maruz kaldığı ve bunların neticesinde bu tip köprülerde yorulma probleminin ne seviyede olduğunun belirlenmesi ve gerekmesi durumunda önlemler alınması kaçınılmazdır. Bunun için gerekli nümerik yöntemlerin varlığı yanında gerçek boyutlu köprü eleman ve birleşimlerini test edebilecek bir yorulma laboratuvarının ve bu konuda tecrübe kazanmış bir araştırma grubunun varlığı da çok önemlidir. Bu çalışmada, ülkemizdeki perçinli çelik demiryolu köprüleri için başlatılan yorulma deneyleri ve ömür tayin yöntemi anlatılacak ve bu çalışmanın üzerine yapılması gerekli çalışmalar hakkındaki fikirler paylaşılabacaktır.

Anahtar Kelimeler: Perçinli çelik demiryolu köprüsü, Yorulma ömrü, Tam ölçekli test

Identification of Riveted Steel Bridges' Fatigue Life

ABSTRACT: Crack or crack-like discontinuities is an important phenomenon that causes damage in many engineering structures. The most important thing to overcome such formations are to take fatigue into consideration during the design procedure and the manufacturing process that could help avoiding the formation of cracks due to the detail and workmanship. It is also required to be examined periodically throughout the service life of the structure. However, the formation of cracks or crack-like discontinuities are inevitable. Taking into consideration of Their presence in terms of brittle fracture and fatigue is under the responsibility of engineers. By completing the rail line between the years 1856 -1866 İzmir- Aydın, 1865 İzmir Turgutlu-Afyon, 1873 Haydarpaşa-Izmit, 1888 İstanbul-Edirne-Kırklareli-Alpullu, Turkey come across with the riveted steel railway bridges. Considering construction years these are the bridges who are over 100 years old and are subjected to constant dynamic loads. As a result, it is a necessity to determine the level of fatigue damage in this type of bridges, not by doing analytical studies but also by testing full-scale riveted bridge members and their connections. It is obvious, the presence of a fatigue laboratory to test and research group has gained experience in this regard is very important. In this study, started riveted steel railway bridges' member tests in the country

and fatigue life prediction will be described in measure experiments done at Haslab full scale fatigue test laboratory.

Key Words : *Revited steel railway bridges, Fatigu life, Full-scale fatigue test*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Demiryolu hatlarımızın 100 yıldan daha uzun bir süredir hizmet verdiği, bu süre zarfında yolcu ve yük taşımacılığının gerek trafik gerekse tonaj olarak arttığı, söz konusu köprülerin proje safhasında hesap edilen yük taşıma kapasitelerinin üzerine etki eden yüklere oranının giderek azaldığı açıktır. Demiryolu hatlarındaki perçinli çelik köprülerin projelendirilme safhasında düşünülen yorulma ömrünü ne kadar tamamladığıysa şu anda cevabı aranan sorudur. Ayrıca Avrupa Birliği ile bütünleşme (entegrasyon) çerçevesinde arttırılacak dingil basıncı için çalışmalar TCDD-İTÜ işbirliği ile başlamış ancak yorulma konusu henüz incelenmemiştir.

Ülkemiz çelik demiryolu köprüleri bu genel yapı içerisinde değerlendirilecek olursa, gerek mevcut yorulma hasar birikimini tespit etmek, gerekse geriye kalan yorulma ömürlerini tayin etmek, serviste kalıp kalmayacaklarına, kalacaklarsa ne şekilde takviye veya kısıtlama gerektireceklerine karar vermek gerekmektedir. Bilindiği üzere, tekrarlı yükler altında, mikro çatlakların makro hale gelmesiyle elemanın taşıma gücünü erken yitirmesi şeklinde tanımlayabileceğimiz yorulma, oldukça düşük gerilmelerde dahi kendini gösterebilmektedir.

Tüm dünyada, gerçek boyutlardaki perçinli elemanlar üzerinde yorulma deneyleri yapılmaktadır. Reemsnyder (1975), yüksek gerilme aralıklarında, perçinli kafes birleşimleri üzerinde çalışmıştır. Out, Fisher ve Yen (1984) , 6 adet perçinli yapma boylama kirişini, 48 ile 69 N/mm² gerilme aralığında ve yüksek tekrar sayılarında çalıştırmışlardır. Baker ve Kulak (1985) tarafından gerçekleştirilen testler de ise gerilme aralığı 165 ile 188 N/mm² 'de tutulmuştur. Brühwiler, Smith ve Hirt (1990) tarafından, mevcut köprüden alınan üç adet boylama kirişi 60 ile 120 N/mm² 'lik gerilmelerde ve yüksek tekrar sayılarında teste tabi tutulmuştur.

Gerek Amerikan Eyalet Karayolları ve Taşımacılık Birliği (AASHTO,1989) gerekse Amerikan Demiryolu Mühendisleri Birliği (AREA, 1991, AREMA, 1997) standartlarının ilgili maddeleri, bu tip deneylerden elde edilen verileri kullanarak tespit edilmiştir.

Böyle bir profil içerisinde, perçinli demiryolu köprü elemanlarının yorulma hasar birikimini ve geriye kalan yorulma ömürleri tayininin makul derecede yapılabilmesi amacıyla AASHTO' nun tanımladığı C ve D kategorileri için daha fazla bilgi üretmek, ülkemiz çelik demiryolu köprülerinde yorulmaya sebep olacak kritik gerilme değerini tayin etmek, bu gerilmeleri meydana getiren demiryolu lokomotif ve vagonlarını tespit etmek, dolayısıyla kritik gerilmeye sebep olmayan katar oluşumunu yorulma hasarı hesabında devre dışı bırakmak, elemanların mevcut yorulma birikimlerini belirleyip geri kalan yorulma ömürlerini saptamak, demiryolu köprülerinden başlayarak ülkemizin tüm yapıları için kullanılabilecek yorulmaya ait bir veri tabanına data üretmek amaç edinilmiştir.

Bu amaç doğrultusunda, yorulma deneyleri Türkiye' nin ilk Gerçek Boyutlu Taşıyıcı Elemanlar için Yorulma Laboratuvarı HASLAB (Hasar Tespit Laboratuvarı)'da gerçekleştirilmiştir. Bu laboratuvar NATO Science for Stability programınca destekli TU-Bridges "Rehabilitation of old railway bridges" Araştırma Projesi kapsamında, İTÜ Rektörlüğü ile TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü arasında imzalanmış olan işbirliği protokolü çerçevesinde Haydarpaşa' da kurulmuştur.

Yaklaşım (Approach)

Yüksek tekrarlı (2x10⁶ tekrar), büyük numune yorulma deneyleri oldukça iyi bir laboratuvar altyapısı, para ve zaman gerektiren testler olması nedeniyle sık yapılan testler değildir. Günümüz teknolojiyle bile bir test 1 haftadan çok daha uzun sürebilmektedir. Ancak, yorulma mukavemeti alt

sınırının tanımlanmasındaki yetersiz sayıdaki test verileri nedeniyle mevcut belirsizlikleri yok etmek ve mümkün olduğunca gerçek davranışı ifade edebilmek için uzun süreli ve gerçek boyutlu numunelerin testi, gereklilikten çok günümüz mühendisliği için bir zorunluluk haline gelmiştir.

Bu amaçla, TCDD ile yapılan anlaşma çerçevesinde 1912 ile 1976 yılları arasında hizmet vermiş ancak yol hattının değiştirilmesi nedeniyle şu anda hizmet dışı kalmış Diliskelesi Demiryolu Köprüsü'nden alınacak numuneler üzerinde yorulma testleri yapılmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda dörder adet enleme ve boylama kirişlerinin test edilmesi planlanmıştır, bu parçalar yerinde sökölüp test edilmek üzere Haslab yorulma laboratuvarına teslim edilmiştir.

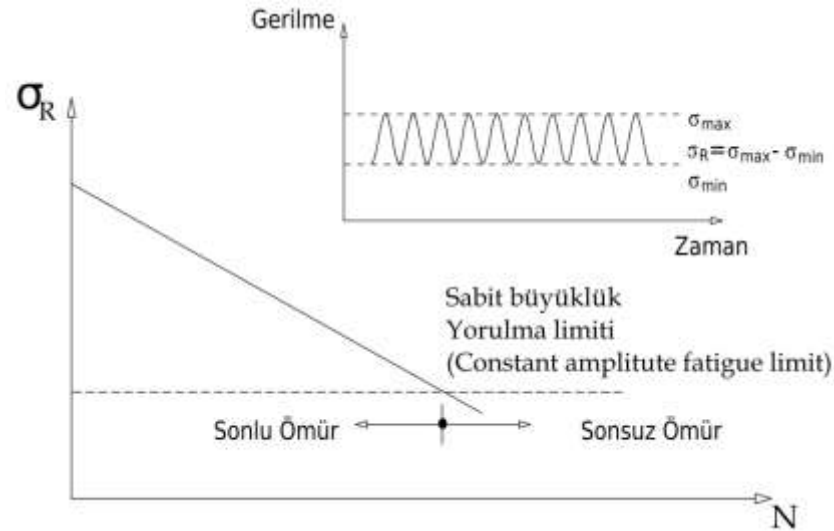
Bununla birlikte, Ankara-İstanbul Demiryolu hattında bulunan ve TU-BRIDGES Araştırma Projesi kapsamında 1992, 1993, 1994 yıllarında test edilen Karaçam, Bekdemir ve Cambazkaya Demiryolu Köprülerinin toplam yorulma hasar birikimleri ve artık yorulma ömürleri, güncellenmiş bilgisayar modelleri (updated computer models) üzerinde, günümüz ve geçmiş katar yük ve trafikleri geçirilerek bulunması kararlaştırılmıştır (Uzgider, 1996).

Söz konusu üç köprünün ilk bilgisayar modelleri orjinal paftaları ve hesap ciltleri esas alınarak üç boyutlu olarak üretilmiş, testlerden alınan kayıtlar doğrultusunda güncellenmiş, gerçek davranışları ifade edebilen nihai modelleri elde edilmiştir. İlgili tüm algoritmalar bu rafine modeller üzerinde uygulanmıştır.

Köprü üzerindeki elemanlarda olabilecek herhangi bir hasarın, trenin raydan kolaylıkla çıkmasına, hatta, söz konusu köprünün tamamıyla kullanılamaz hale gelmesine sebep olacağından, bu elemanların sağlığının köprünün emniyeti açısından önemi açıktır. Özellikle hasar alması durumunda köprünün fonksiyonel işleyişini kaybettirecek elemanlar (boylama, enleme, dikme, alt başlık, üst başlık elemanları gibi), köprüdeki diğer elemanlara göre beher katar başına, nispeten daha fazla gerilme-tekrar sayılarına maruz kalmaları, dolayısıyla yorulma ömürlerinin daha kısa olması başka bir önemli hususu içinde barındırmaktadır.

Elemanların ve bunların perçinli birleşimlerinin yorulma mukavemetlerini ifade etmekte kullanılan ve yukarıda bahsedilen standartlarda da verilen tipik gerilme aralığı-tekrar sayısı eğrisi (S-N Curve) aşağıda verilmiştir (Şekil 1). Logaritmik olmak üzere, düşey eksen gerilme aralığını, yatay eksen ise gerilme tekrar sayısını göstermektedir. Gerilme aralığı, uygulanan maksimum ve minimum gerilmelerin cebirsel farkı olarak tanımlanabilir.

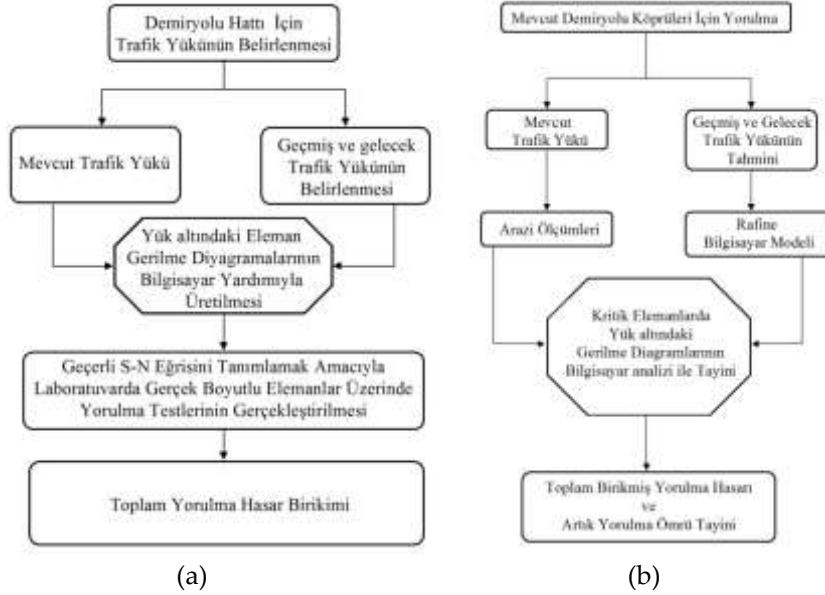
Söz konusu boylama kirişlerde yapılan testler, düşük gerilme aralıklarından başlatılmış (Uzgider ve diğ., 2005), çatlağın oluşmaması durumunda (Run Out) ise uygulanan yük, dolayısıyla gerilme aralığı artırılmıştır. "Run Out" kararı, 8 ile 20 milyon yük tekrar sayısına karşın, kirişte çıplak gözle görülebilir bir çatlağın oluşmaması halinde alınmış ve bu durumda bir önceki sayaç sıfırlanmıştır.



Şekil 1. Karakteristik S-N eğrisi.

Figure 1. Characteristic S-N curve

Laboratuvar deneylerinin yanı sıra, köprünün hizmet verdiği yıllardaki katar tipi, yük ve trafik verileri kullanılarak yükleme modelleri üretilmiş ve yürütülen statik analizler sonucunda boylama kirişler için gerilme tesir çizgileri elde edilmiştir. Bu tesir çizgilerinden hareketle, elemanın yorulma hasar birikimi, J.M. Barsom ve S.T. Rolfe (1987), Miner (1945) tarafından sunulan "Miner Lineer Hasar Birikimi" kuralı yardımıyla tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla birlikte değerlendirilmiştir. Bu safhalar için kullanılan çalışma algoritması Şekil 2' de sunulmuştur.



Şekil. 2. a) Diliskelesi için b) Cambazkaya, Bekdemir ve Karaçam Köprüleri için yorulma analizi akış diyagramı.

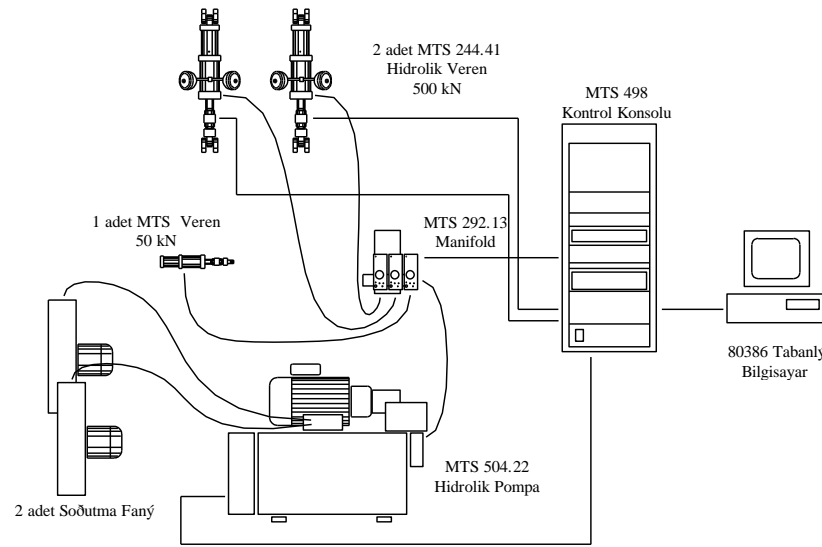
Figure 2. Fatigue analysis flow chart for a) Diliskelesi, b) Cambazkaya Bekdemir and Karaçam Bridges

GERÇEK BOYUTLU KÖPRÜ ELEMANLARINDA YORULMA TESTİ (FULL SCALE FATIGUE TESTS ON BRIDGE MEMBERS)

Test Ekipmanı (Test Equipments)

Yorulma deneyleri, Haydarpaşa' da kurulmuş olan büyük numune Yorulma Laboratuvarı HASLAB' da gerçekleştirilmiştir.

Bu laboratuvardır 400 m2 si kapalı olmak üzere toplam 1000 m2 lik alan üzerine kurulmuştur. İçerisinde 125 kN ve 50 kN olmak üzere iki adet yerden kontrollü vinç bulunmaktadır. 120 cm yüksekliğindeki 18m x 8m lik kuvvetli döşemeye mesnetlendirilmiş yükleme çerçevesine bağlı bulunan 2 adet 500 kN' luk, ve ayrıca küçük numune deneylerinde kullanmak üzere 1 adet 50 kN' luk yüksek frekanslı yükleme yapabilen hidrolik veren bulunmaktadır. Tüm bu sistem bilgisayar destekli bir kontrol paneli üzerinden kumanda edilmektedir (bkz Şekil 3).

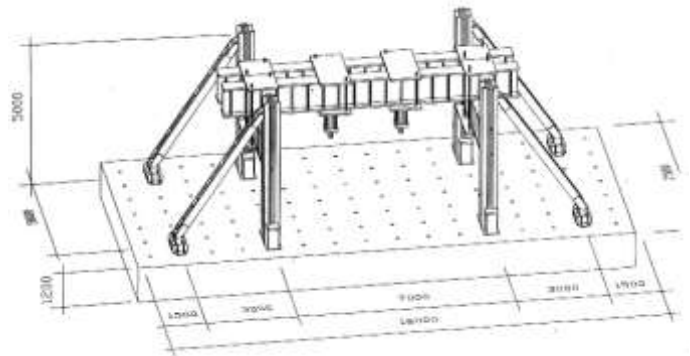


Şekil 3. Yorulma laboratuvarı sistem şeması

Figure 3. Fatigue laboratory system diagram

Yükleme Çerçevesi (Loading Frame)

Yorulmaya ömrü sonsuz olarak boyutlandırılmış çerçevenin yapımında 900 kN St37 ve St52 çeliği kullanılmıştır. Çerçeve 18.0x8.0x1.2 m.'lik kuvvetli betonarme döşeme üzerine monte edilmiştir (Şekil 4). Çerçevenin yüksekliği, genişliği ve açıklığı ayarlanabilmektedir.



Şekil 4. Yüklem çerçevesi

Figure 4. Loading frame

Test Numuneleri (Test Specimens)

Test edilen numuneler, Diliskelesi Demiryolu Köprüsü' nünden sökülerek laboratuvara getirilen boylama kirişleridir. Kafes kiriş şeklinde inşa edilen köprü, tek hatlı olup, iki açıklıklı basit kiriş tarzındadır. Herbir açıklığı 31.00 m. olan köprü'nün ikinci açıklığı, hattın değiştirilmesinden sonra kaldırılmış, ancak ilk açıklıktaki köprü yerini muhafaza etmektedir. (Şekil 5).

Köprüde kullanılan boylama kirişler NPI475 hadde profili olup Rombach firması tarafından imal edilmişlerdir. Çeliği, Wrought Iron' dır. Elemanlarda yer yer önemli miktarda korozyon tespit edilmiştir.

Elemanlar test düzeneğine yerleştirilmeden önce kumlanmış, tamamen temizlenmiş ve oluşacak muhtemel çatlağın kolayca fark edilip izlenebilmesi için beyaz kireçle boyanmıştır.



Şekil. 5. Diliskelesi (perçinli demiryolu) köprüsü
Figure 5. Diliskelesi (riveted railway) Bridge

Test Düzenegi (Test Setup)

Yükleme 4 noktadan tanımlanmıştır (Four-Point Bending) (Şekil 6), bu amaçla mesnet takımları ve yüklem kırı ile yanal burkulmaya karşı numuneyi tutacak elemanlar imal edilmiştir (Şekil 7).

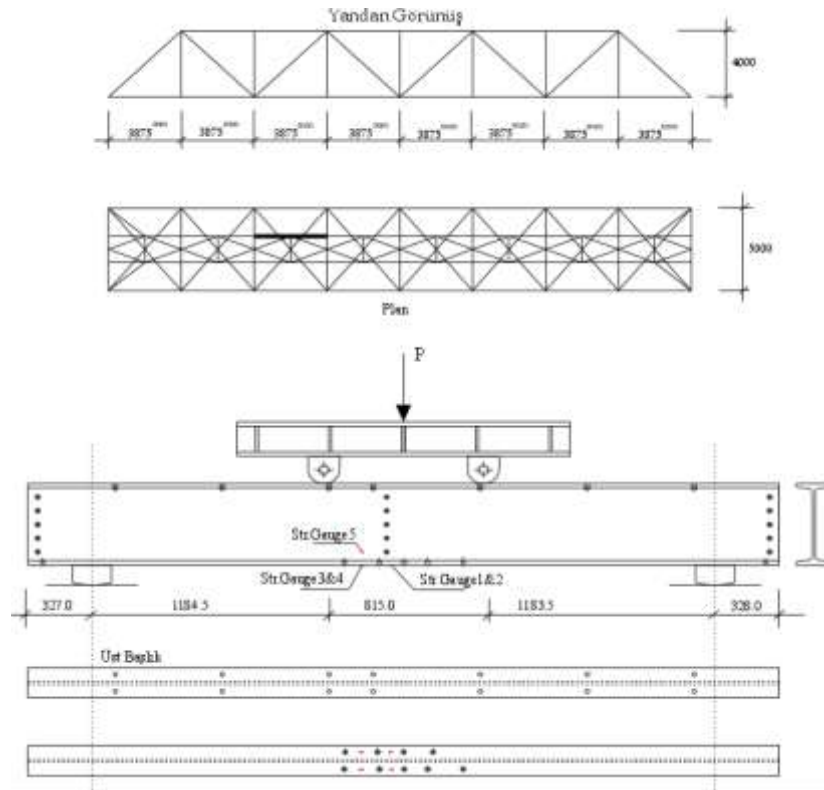
Bu yöntemle, kırı yük etkiye noktalar arasındaki orta kısmında sabit moment ve kesme kuvveti etkisi olmaksızın, muhtemel bir yorulma çatlağının oluşacağı bir bölgede, sabit bir gerilme dağılımı elde edilmektedir.

Kontrol paneli üzerinden tanımlanan test yüklem profiline etki ettirilecek yüklerin yanı sıra yük değişim limiti, deplasman limiti ve gerilme limitleri de tanımlanmıştır. Böylece çatlak oluştuğu anda yük, deplasman yada gerilmedeki değişim ile birlikte test otomatik olarak kontrol paneli tarafından durdurulması sağlanmıştır.

Testlerin, şu ana kadar üzerinde fazla çalışılmamış olan düşük gerilme aralıklarından ve yüksek yük tekrar sayılarından başlatılması planlanmış, malzemenin davranışına göre gerilme aralığının yükseltilmesine karar verilmiştir.



Şekil. 6. Test düzenegi
Figure 6. Test setup



Şekil. 7. Boylama kirişi ve yükle şekli

Figure 7. Longitudinal beam and loading setup

DİLİSKELESİ KÖPRÜSÜNÜN MODELLENMESİ VE BOYLAMA KİRİŞLER İÇİN YORULMA (MODELING OF DİLİSKELESİ BRIDGE AND FATIGUE CHECK FOR LONGITUTUNAL MEMBERS)

Yaklaşım (Approach)

Bölüm 2 ve Şekil 2a' da tanımlanan akış diyagramında verilen adımlar takip edilerek yorulma ile ilgili çalışma gerçekleştirilmiştir.

Demiryolu Hattı için Trafik Yükünün Belirlenmesi (Determining The Railroad Traffic Load)

Diliskelesi Demiryolu Köprüsü' nün hizmet verdiği yıllara ait lokomotif, vagon tipleri ve katar bilgileri, TCDD arşivlerinden elde edilebilen belgeler doğrultusunda tespit edilmiştir. Bu araştırma sırasında, 1912 ile 1976 yılları arasındaki 64 yıl, yükleme tiplerinin farklılığının yanı sıra dönemin ekonomik ve politik etkenleri de göz önüne alınarak 6 farklı zaman dilimine ayrılmış, her dönemin karakteri ve TCDD arşivinden gelen belgeler doğrultusunda katarlar oluşturulmuştur.

Eleman Gerilme Tesir Çingularının Bilgisayar Yardımıyla Üretilmesi (Optaning The Member Stress Influence Lines By Using Computer)

Diliskelesi köprüsü üzerinden sökülerek getirilen enleme ve boylama kirişlerine öncelik verilerek, köprü'nün bütün elemanları Bölüm 3.1 çerçevesinde belirlenen katarlar altında gerilme tesir çizgilerini elde etmek amacıyla köprü'nün 3 boyutlu bilgisayar modeli ve yükleme profilleri hazırlanmıştır. Belirlenen farklı yükleme katarlarının Cosmos\M (1991) sonlu elemanlar programı kullanılarak köprü modeli üzerine yürütülmesi sonucu boylama kirişlerin ve diğer elemanlarının gerilme tesir çizgileri elde edilmiştir.

Bu tesir çizgileri daha sonra Fisher, Yen ve Wang (1987; 1989) tarafından sunulan "Rainflow Counting" işlemine tabi tutularak elemanın bu yükler altındaki gerilme tekrar sayıları elde edilmiştir.

Gerçek Boyutlu Elemanlar Üzerinde Yorulma Testi (Full-Scale Fatigue Tests)

Değişik laboratuvarlarda şu ana kadar gerçekleştirilmiş olan büyük numune yorulma deneyleri, yüksek gerilme aralıklarında ve düşük tekrar sayılarında yapılmıştır. Bu nedenle, "wrought-iron" ve yumuşak çelik (mild steel) den yapılmış olan perçinli köprü taşıyıcı elemanlarının sabit genlikli yorulma limiti çok belirgin değildir. Yapılacak testlerin çıkış noktası budur.

AASHTO kategori. D ve C yorulma limitlerindeki bu belirsizliği ortadan kaldırabilmek ve bu bölge içinde daha sağlıklı kararlar verebilmek için söz konusu yorulma deneyleri planlanmıştır.

Toplam Hasar Birikiminin Tayini (Determination Of Cumulative Damage)

Laboratuvar testlerinin tamamlanmasından sonra elde edilen datalarla, bilgisayar modelinin statik çözümünden elde edilen eleman gerilme tesir çizgileri birlikte değerlendirilerek, Miner tarafından 1945 de geliştirilen, J.M.Barsom ile S.T.Rolfe (1987) tarafından sunulan ve "Lineer Hasar Birikimi Teorisi" veya kısaca Miner kuralı olarak bilinen teori yardımıyla toplam hasar birikimi hazırlanan bir yazılım ile hesaplanmıştır.

Geçmiş Trafiğin ve Katarların Belirlenmesi (Determination of the Past Train Traffic and Wagon Sequences)

Köprünün hizmet verdiği 64 yıl, altı farklı döneme ayrılmıştır:

1912-1922 1923-1937 1938-1949 1950-1964 1965-1969 1970-1976

Bu dönemlere ait TCDD arşivlerinden (Genel Müdürlüğü İstatistik Yıllığı, Tren Sefer ve Katar Bilgileri) elde edilebilen belgelerden de faydalanarak tipik lokomotif, vagon ve katarlar belirlenmiştir.

Çizelge 1. Diliskelesi Köprüsü 1912-1976 yılları arası katar geçiş sayıları.

Table 1. Diliskelesi bridge, 1912-1976 train passage counts

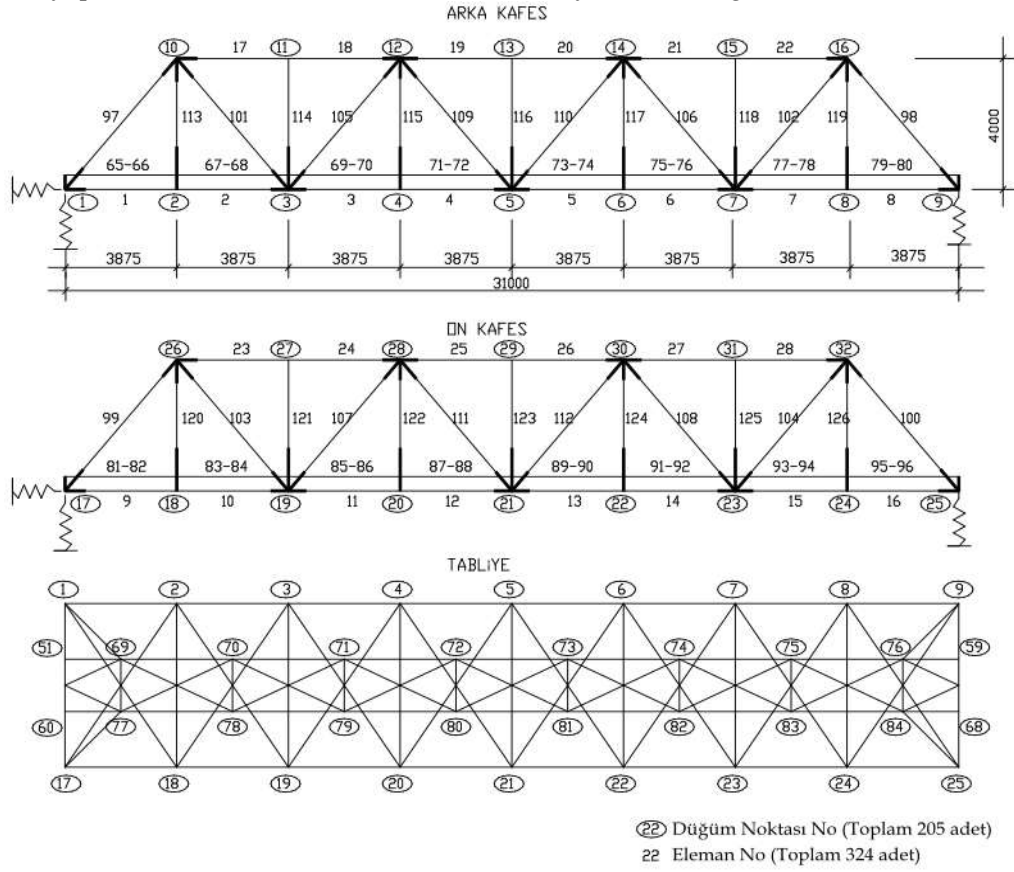
DÖNEM	KATAR TİPİ	GÜNLÜK GEÇİŞ	YILLIK GEÇİŞ
1912-1922	Yük	4	1460
	Yolcu	4	1460
	Karışık (Mix)	4	1460
1923-1937	Yük	8	2920
	Yolcu	6	2190
	Karışık (Mix)	6	2190
1938-1949	Yük	10	3650
	Yolcu	6	2190
	Karışık (Mix)	6	2190
1950-1964	Yük	10	3650
	Yolcu	6	2190
	Karışık (Mix)	6	2190
1965-1969	Yük	12	4380
	Yolcu	8	2920
	Karışık (Mix)	6	2190
1970-1976	Yük	16	5840
	Yolcu	14	5110
	Karışık (Mix)	6	2190

Köprünün Bilgisayar Modeli (Computer Model Of The Bridge)

Projesi "Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit Eisernem Überbau auf den Prinzipischen Staatseisenbahnen vom 1 May 1903" şartnamesine göre yapılan Diliskelesi Demiryolu Köprüsü' nün bilgisayar modeli, orjinal projeleri ve köprüden alınan fotoğraflar esas alınarak hazırlanmıştır.

Tüm yapısal düzensizlikleri ve rijitlik değişikliklerini içeren bu bilgisayar modelinde, altı serbestlik dereceli çubuk elemanlar kullanılmıştır. Düğüm noktalarında kullanılan birleşim levhaları ve enleme-

dikme birleşimlerindeki guseler, rijit çubuklarla modellenmiştir (Şekil 8). Mesnet bölgelerinde yaylar tanımlanarak yapının davranışı ile modelin davranışının aynı olması sağlanmıştır.

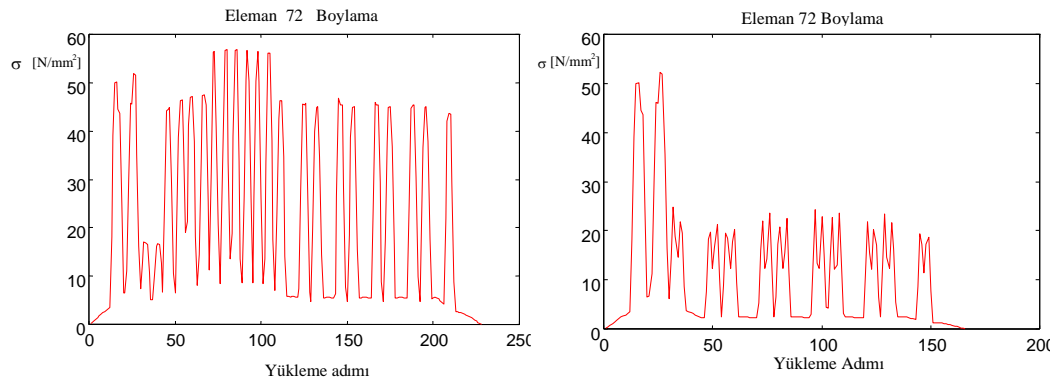


Şekil. 8. Diliskelesi köprü modeli

Figure 8. Computer model of Diliskelesi Bridge

Belirlenen Katar Tiplerinin Model Üzerinde Yürütülmesi (Applying the Moving Load of the Selected Train Sequences to the Bridge Model)

Belirlenen katar tipleri 50 cm adım aralıkları ile bilgisayar ortamında köprü modeli üzerinde yürütülmüş ve her eleman için katarın değişik pozisyonlarına bağlı çubuk uç kuvvetleri ve gerilmeler elde edilmiştir (Şekil 9).

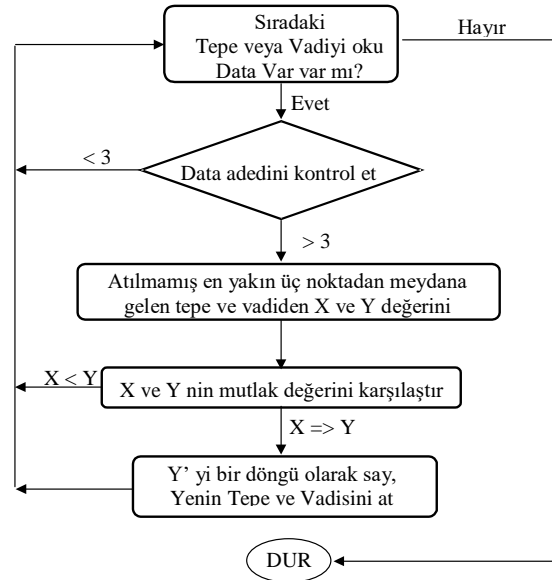


Şekil. 9. Değişik katar tipleri için tipik gerilme – yük adımı grafiği

Figure 9. Moving load step-stress graph for a load train (rainflow count)

Katarların köprüden geçirilmesiyle elde edilen gerilme tesir çizgilerinin, ASTM (1986) standardında verilen ve Downing ve Socie (1982) tarafından geliştirilen "Rainflow Counting" algoritması kullanılarak gerilme tekrar sayıları (cycle count) Matlab (1992) altında yazılan bir program ile sayılmıştır. Söz konusu algoritma akış diyagramı Şekil 10.a' da verilmiştir:

Tasarımda, %1 veya daha az gerçekleşme olasılığına sahip darbe katsayıları kullanılmaktadır. Böylece, bir demiryolu köprüsünün normal şartlarda tasarım ömrü olan 80 yılda, bu seviyedeki darbe katsayısı, oldukça muhtemel olarak yalnız birkaç kez gerçekleşebilir. BE ve AREMA standartlarına göre hesaplanmış olan darbe katsayıları değerlerinin, arazide köprü üzerinde yapılmış olan statik ve dinamik ölçümlerden elde edilenlerle (bkz Çizelge 2) mukayese edilip büyük değer hesaplarda göz önüne alınmıştır. Gerilme aralıkları ve tekrar sayıları örnek olarak Şekil 10.b, Çizelge 3 ve 4' de verilmiştir.



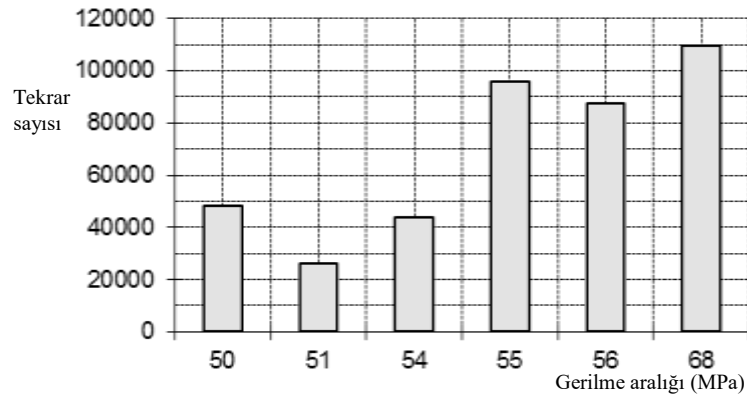
Şekil 10. a) Tekrar sayısı hesaplama akış diyagramı

Figure 10. a) Rainflow counting flow chart

Çizelge 2. 1992-1994 yılları arası test edilmiş makas köprülerden bulunan darbe (φ) değerlerinin istatistiği.

Table 2. Statistical study for impact factor (φ) for the truss bridges tested between 1992-1994

Eleman tipi	Ortalama	Maksimum	Standart sapma
Üst başlık	1.0844	1.2167	0.0769
Alt başlık	1.1031	1.2167	0.0639
Diyagonaller	1.0666	1.2362	0.0262
Dikme	1.0911	1.3306	0.0331
Enleme	1.0847	1.2766	0.0307
Boylama	1.051	1.2621	0.0254



Şekil 10. b) Tekrar sayısı-gerilme aralığı histogramı (enleme kirişi için)

Figure 10. b) Rainflow counting (transverse beam)

Çizelge 3. a) Enleme kirişleri için gerilme aralığı tekrar sayısı.

Table 3. a) Rainflow count for transverse beam

GERİLME ARALIĞI (N/mm ²)	GERİLME ARALIĞI (Darbe Katsayısı $\square=1.32$) (N/mm ²)	TEKRAR SAYISI
40	53	35770
41	54	13330
46	61	48180
50	66	48180
51	67	26280
54	71	43800
55	73	95630
56	74	87600
68	90	109500

Çizelge 3. b) Boylama kirişleri için gerilme aralığı tekrar sayısı.

Table 3. a) Rainflow count for longitudinal beam

GERİLME ARALIĞI (N/mm ²)	GERİLME ARALIĞI (Darbe Katsayısı $\square=1.32$) (N/mm ²)	TEKRAR SAYISI
37.9	50	418290
38.6	51	172280
39.4	52	497130
40.9	54	197100
41.7	55	118990
42.4	56	57670
43.9	58	191260
45.5	60	40880
47	62	62780
48	63	25120
49	64	48180
51	67	52560
52	68	25550
55	72	43800
57	75	62780
59	77	120450
73	96	109500

Test Edilen Kirişlerin Hali Hazır Yorulmalarının Tayini ve Artık Yorulma Ömürlerinin Saptanması (Determining The Cumulative Fatigue Damages And Remaining Fatigue Life of the Tested Beams)

Günümüzde "Miner Kuralı" olarak bilinen lineer hasar kuralı, ilk olarak 1924' de Palmgren tarafından sunulmuş, 1945 de Miner tarafından geliştirilmiştir (Denklem, 1 ve 2).

n, S gerilme aralığı seviyesindeki tekrar sayısı ve N de, bu gerilme seviyesindeki yük tekrar sayısı cinsinden yorulma ömrü olmak üzere,

$$\frac{n}{N} = \text{Tekrar oranı} \quad (1)$$

olarak hesaplanır. Kullanılan ömür olarak hasar miktarı D ise, yukarıdaki oranın toplamı olarak

$$\sum D_i = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir ve 1'den büyük veya eşit durumu, hasar olarak nitelendirilir.

LABORATUVAR TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME (LABOUTORY TEST RESULTS AND EVALUATION)

Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Diliskelesi Köprüsü'nden alınan test numuneleri üzerinde çekme ve sertlik deneyleri yapılmış, sonuçlar Çizelge 4' de verilmiştir. Yumuşak çelik, "wrought-iron"nın çekme mukavemetleri birbirlerinden çok farklı gözükmemekle birlikte akma gerilmesi ve elastisite modüllerinde fark vardır. Diğer bazı araştırmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4. Malzeme test sonuçları.

Table 4. Material test results

	Wroght iron			Yumuşak çelik		
	Ort.	sd	ns	Ort.	sd	ns
Akma Mukavemeti (N/mm ²)	270	18	5	226	12	8
Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	390	15	5	388	22	8
Elastisite Modülü (N/mm ²)	150000-182000			210000		
Brinnel Sertlik	111.8			120		

Ort. : Ortalama, sd : Standart Sapma, ns : Numune Sayısı

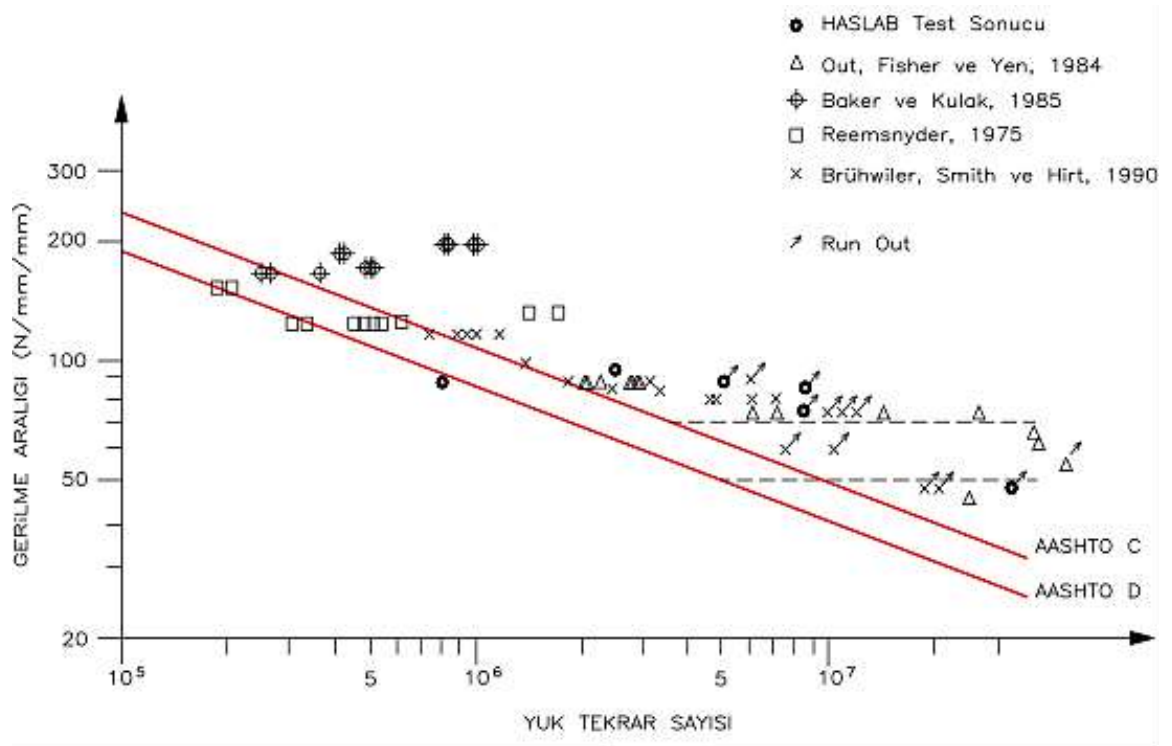
Yorulma Testi (Fatigue Tests)

Daha önceki bölümlerde verilen esaslar altında yapılan yorulma test sonuçları Çizelge 5 ve Şekil 11' de verilmiştir. Şekil 12' de test düzeneği ve deney sonu oluşan yorulma çatlakları görülmektedir

Çizelge 5. Yorulma deneyi sonuçları.

Table 5. Fatigue test results

Kiriş No	Gerilme aralığı (N/mm ²)	Tük tekrar sayısı (x1000)	Çatlak yeri	Notlar
1	49	12142	Run out	Yük arttırıldı
	75	850	Run out	Yük arttırıldı
	84	850	Run out	Yük arttırıldı
	95	1608	Perçin yanı	Ani kırılma
2	89	832	Perçin yanı	Çatlak
3	89	5100	Run out	Yük arttırıldı



Şekil. 11. Test sonuçlarının diğer laboratuvarların sonuçlarıyla karşılaştırılması

Figure 11. Comparison of test results with other laboratories' test results



Şekil. 12. Test düzeneği ve yorulma çatlağı

Figure 12. Test setup and fatigue crack

TEST SONUÇLARININ İNCELENMESİ VE YORULMA ÖMRÜ TAYİNİ (EVALUATION OF THE TEST RESULTS AND FATIGUE LIFE PREDICTION)

Çizelge 3a ve 3b' de toplu olarak sunulan gerilme aralığı-tekrar sayısı sonuçlarının değerlendirilmesinde "Miner Lineer Hasar Birikimi" metodundan ve AASHTO S-N diyagramından hareketle (Denklemler 3);

$$N = M \Delta\sigma_r^{-3} \quad (3)$$

M : AASHTO D ve C kategorileri katsayısı

$\Delta\sigma_r$: gerilme aralığı

olamak üzere;

D kategorisi eğrisi için $N = 7.64572 \times 10^{11} \times \Delta\sigma_r^{-3}$

C kategorisi eğrisi için $N = 1.52914 \times 10^{12} \times \Delta\sigma_r^{-3}$ dir.

Yorulma limiti D kategorisi için 49.2 N/mm², C kategorisi için ise 70.3 N/mm² olduğundan, bu gerilmeler altındaki değerler ihmal edilerek, Diliskelesi köprüsünün enleme ve boylama kirişlerine ait yorulma hasar birikimi hesaplanmıştır (Çizelge 6-7).

Çizelge 6. Diliskelesi Köprüsü enleme kirişlerinde toplam yorulma hasarı (darbe katsayısı $\varphi=1.32$).

Table 6. Cumulative fatigue damage for Diliskelesi bridge transverse beams (impact factor $\varphi=1.32$).

AASHTO Kat. D (ECCS71)				AASHTO Kat. C (ECCS90)	
Gerilme N/mm ² A	Toplam Tekrar B	N C	Toplam Hasar D=B/C	N E	Toplam Hasar F=B/E
53	35770	5194176	0.0069	-	-
54	13330	4823308	0.0028	-	-
61	48180	3415255	0.0141	-	-
66	48180	2659418	0.0181	-	-
67	26280	2506029	0.0105	-	-
71	43800	2111132	0.0207	4222252	0.0104
73	95630	1998060	0.0479	3996110	0.0239
74	87600	1892921	0.0462	3785832	0.0231
90	109500	1057231	0.1036	2114456	0.0518
			% 27.1	% 10.9	

Çizelge 7. Diliskelesi Köprüsü boylama kirişlerinde toplam yorulma hasarı ($\varphi=1.31$).

Table 7. Cumulative fatigue damage for Diliskelesi bridge longitudinal beams (impact factor $\varphi=1.31$).

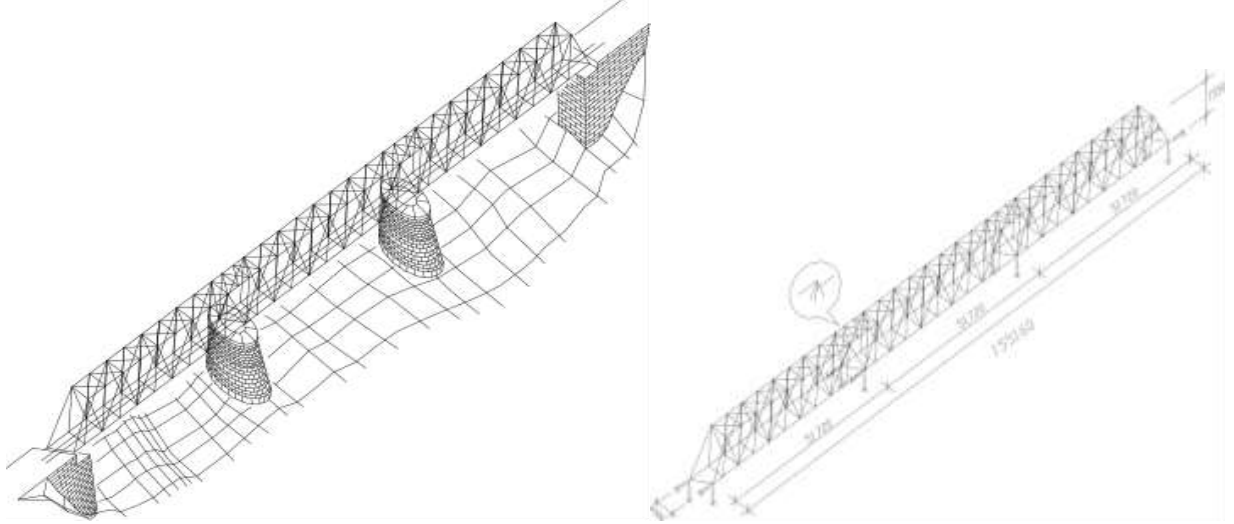
AASHTO Kat. D (ECCS71)				AASHTO Kat. C (ECCS90)	
Gerilme N/mm ² A	Toplam Tekrar B	N C	Toplam Hasar D=B/C	N E	Toplam Hasar F=B/E
50	418290	6198031	0.0675	-	-
51	172280	5733379	0.0300	-	-
52	497130	5314036	0.0936	-	-
54	197100	4934611	0.0399	-	-
55	118990	4590464	0.0259	-	-
56	57670	4277590	0.0113	-	-
58	191260	3992514	0.0480	-	-
60	40880	3494065	0.0117	-	-
62	62780	3275751	0.0192	-	-
63	25120	3075253	0.0082	-	-
64	48180	2890788	0.0167	-	-
67	52560	2563858	0.0205	-	-
68	25550	2418769	0.0106	-	-
72	43800	2044167	0.0214	4088324	0.0107
75	62780	1836453	0.0342	3672897	0.0171
77	120450	1655955	0.0727	3311901	0.0364
96	109500	874251	0.1253	1748497	0.0626
			% 65.9	% 12.7	

SEÇİLMİŞ DİĞER KÖPRÜLER İÇİN YORULMA KONTROLÜ (FATIGUE CHECKS FOR THE SELECTED BRIDGES)

Diliskelesi Demiryolu Köprüsünden çıkarılan boylama kirişlerinin testinden şu ana kadar elde edilen verilerin hepsi AASHTO C kategorisi yorulma limitinin üzerindedir. Ancak henüz yeterli test yapılmadığı için hangi kategoriye girdiğini belirtmek zordur. Bunun için seçilen köprülerin yorulma bakımından değerlendirilmesi aşamasında her iki kategoriye yani AASHTO D (ECCS 71) ve AASHTO C (ECCS 90) kategorilerine göre kontroller yapılmıştır.

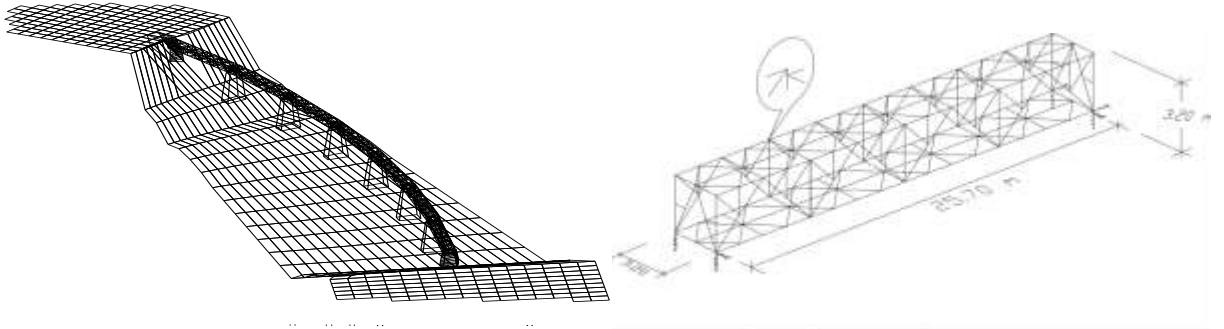
Köprülerin Bilgisayar Modelleri (Computer Models of the Bridges)

İlk bilgisayar modelleri, orijinal pafta ve hesap ciltlerine göre üç boyutlu olarak üretilen köprülerin nihai modelleri, arazi testlerinden toplanan verilerin ışığı altında, gerçek davranışlarına uygun olarak güncellenmiştir (Uzgider, 1996). Modeller, tüm yapısal düzensizlik ve süreksizlikleri dikkate alınarak yapılmıştır.



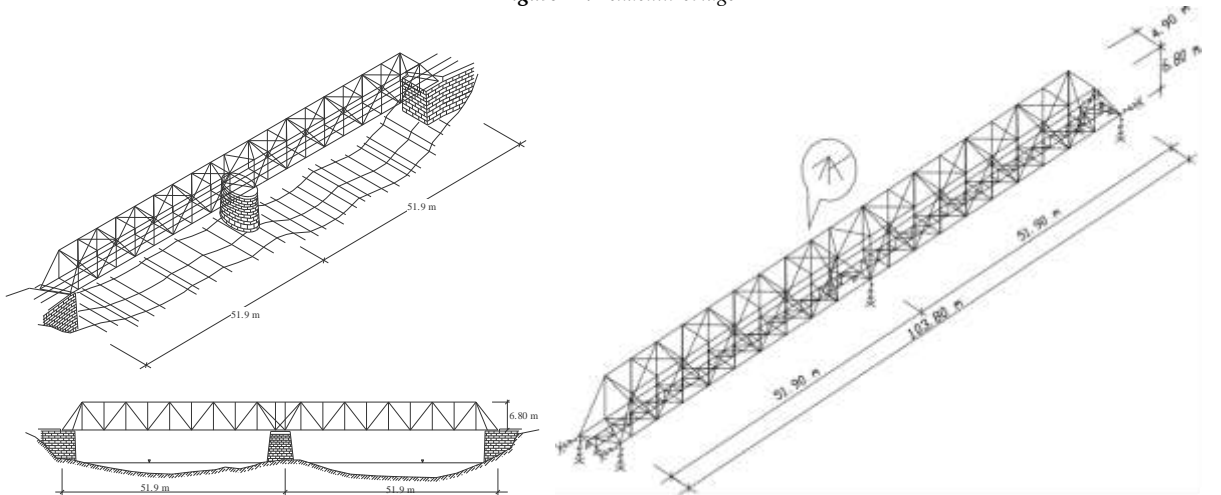
Şekil. 13. Karaçam köprüsü (ölçüler mm)

Figure 13. Karaçam Bridge



Şekil. 14. Bekdemir köprüsü (ölçüler m)

Figure 14. Bekdemir bridge



Şekil. 15. Cambazkaya köprüsü (ölçüler m)

Figure 15. Cambazkaya Bridge

YORULMA ÖMRÜ TAYİNİ (FATIGUE LIFE EVALUATION)

Herbir köprü modeli üzerinde daha önceden seçilmiş yük katarları 50cm adımlarla yürütülerek her bir eleman için uç kuvvet ve gerilme değerleri katarın farklı pozisyonları için elde edilmiştir.

AASHTO D (ECCS 71) ve AASHTO C (ECCS 90) kategorilerine göre toplam yorulma hasarı kontrolleri yapılmış ve en olumsuz sonuçların çıktığı elemanlar seçilerek izleyen tablolarda verilmiştir.

Çizelge 8. Karaçam Köprüsü boylama kirişlerinde toplam yorulma hasarı ($\varphi=1.31$).

Table 8. Cumulative fatigue damage for Karaçam bridge longitudinal beams (impact factor $\varphi=1.31$).

Gerilme N/mm ² A	Toplam Tekrar B	AASHTO Kat. D (ECCS71)		AASHTO Kat. C (ECCS90)	
		N	Toplam Hasar	N	Toplam Hasar
		C	D=B/C	E	F=B/E
72	15330	2063869	0.0074	4127728	0.0037
74	25550	1850544	0.0138	3701078	0.0069
92	21900	989273	0.0221	1978541	0.0111
94	51100	908005	0.0563	1816006	0.0281
96	45990	870695	0.0528	1741385	0.0264
97	50370	835401	0.0603	1670797	0.0301
100	70080	770335	0.0910	1540666	0.0455
126	10950	379047	0.0289	758091	0.0144
130	140160	345291	0.4059	690580	0.2030
132	21900	334933	0.0654	669864	0.0327
134	10950	315427	0.0347	630853	0.0174
138	32850	288911	0.1137	577820	0.0569
141	18250	272864	0.0669	545726	0.0334
142	32850	265285	0.1238	530568	0.0619
156	54750	202911	0.2698	405821	0.1349
			% 141.3	% 70.6	

Çizelge 9. Bekdemir Köprüsü enleme kirişlerinde toplam yorulma hasarı ($\varphi=1.31$).

Table 9. Cumulative fatigue damage for Bekdemir bridge transverse beams (impact factor $\varphi=1.31$).

Gerilme N/mm ² A	Toplam Tekrar B	AASHTO Kat. D (ECCS71)		AASHTO Kat. C (ECCS90)	
		N	Toplam Hasar	N	Toplam Hasar
		C	D=B/C	E	F=B/E
51	95630	5683175	0.0168	-	-
52	117530	5295824	0.0222	-	-
55	54750	4620632	0.0118	-	-
59	25550	3807283	0.0067	-	-
66	15330	2673977	0.0057	-	-
67	25550	2530759	0.0101	-	-
88	73000	1128084	0.0647	2256162	0.0324
92	163520	998056	0.1638	1996108	0.0819
94	35770	922288	0.0388	1844572	0.0194
95	178120	887269	0.2008	1774532	0.1004
100	25550	763655	0.0335	1527306	0.0167
101	21900	736384	0.0297	1472765	0.0149
110	120450	577579	0.2085	1155155	0.1043
118	23360	461343	0.0506	922683	0.0253
120	17520	447364	0.0392	894725	0.0196
121	17520	433944	0.0404	867885	0.0202
			% 94.3	% 43.5	

Çizelge 10. Cambazkaya Köprüsü Dikme elemanlarında toplam yorulma hasarı ($\varphi=1.31$).*Table 10. Cumulative fatigue damage for Cambazkaya bridge vertical truss members (impact factor $\varphi=1.31$).*

Gerilme N/mm ² A	Toplam Tekrar B	AASHTO Kat. D (ECCS71)		AASHTO Kat. C (ECCS90)	
		N	Toplam Hasar	N	Toplam Hasar
		C	D=B/C	E	F=B/E
74	73000	1850544	0.0394	3701078	0.0197
81	105120	1431772	0.0734	2863537	0.0367
82	25550	1363604	0.0187	2727202	0.0094
93	25550	947478	0.0270	1894952	0.0135
94	52560	908005	0.0579	1816006	0.0289
100	21900	770335	0.0284	1540666	0.0142
101	140160	740325	0.1893	1480647	0.0947
102	79570	711855	0.1118	1423705	0.0559
105	54750	659147	0.0831	1318290	0.0415
106	65700	634737	0.1035	1269470	0.0518
114	21900	510938	0.0429	1021873	0.0214
116	14600	493521	0.0296	987040	0.0148
			%80.5	%43.3	

Söz konusu köprülerin artık yorulma ömürlerinin hesabında bugünkü katar yük ve trafiği ile darbe katsayıları esas alınmış ve köprülerin en kritik elemanlarına göre ayrı ayrı yapılmıştır.

İleride katar, yük ve geçiş sayısı ile yol şartlarının değişmesinden dolayı ortaya çıkacak farklı darbe katsayıları, şüphesiz bu tahminleri değiştirecektir.

Çizelge 8, Çizelge 9 ve Çizelge 10 irdelendiğinde kategorilere göre harcanmış yorulma ömrü çok büyük değişkenlik göstermektedir. Hatta bir kategoriye göre yorulma ömrünü tamamlamış diğer kategoriye göre hala hizmet verdiği zaman kadar artık ömrü olduğu görülmektedir.

Çizelge 7-10' da bulunan değerler darbe etkisi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Örnek olarak Çizelge 8' deki değerler darbe katsayısı $\varphi=1$ olarak tekrar hesaplanacak olursa kategori D için değer %60.1, kategori C için ise % 29.1 olarak bulunur. Bu sonuç darbe etkisinin ne kadar büyük önem taşıdığını göstermesi bakımından çok güzel bir örnektir.

Dolayısıyla adı geçen standartlardaki yorulma limit değerlerinin daha belirgin hale getirilmesi kaçınılmaz bir zorunluluktur.

SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND FURTHER STUDIES)

NATO Science for Stability programınca destekli TU-Bridges "Rehabilitation of old railway bridges" Araştırma Projesi kapsamında, İTÜ Rektörlüğü ile TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü arasında imzalanmış olan işbirliği protokolü çerçevesinde başlamış bu proje kapsamında dört adet yüksek lisans tezi tamamlanmıştır. Bu tezlerden bir tanesinde aynı hat üzerinde yer alan dört köprü, yorulma hasar birikimleri ve artık yorulma ömürleri açısından incelenmiştir. Yorulma laboratuvarı HASLAB'ın tanıtılması ile ilgili olarak bir çalışma 2005 yılında yayınlanmıştır. Aynı hat üzerinde hizmet vermiş olmaları nedeniyle aynı katar yük ve trafiğine maruz kaldıkları açıktır. Ancak hepsi aynı dönemde hizmete girmedikleri için yorulma ömürlerinin birbirlerinden bir miktar farklı çıkması beklenen bir olgudur.

Ankara İstanbul hattı üzerinde bir güzergahın değiştirilmesi ile bu köprülerden birinin hat dışında kalması bu çalışma için çok büyük bir şans olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu köprüden, Diliskelesi köprüsü, üzerinden sökülen boylama kirişleri üzerinde yorulma deneyleri yapılmıştır. Bununla birlikte, halen Ankara-İstanbul demiryolu hattında hizmet vermekte olan diğer üç köprünün de güncellenmiş bilgisayar modelleri üzerinden bugünkü ve geçmiş katarlar yürütülerek, elemanların gerilme tesir çizgileri çıkarılmış, "Rainflow Counting" yöntemi ile oluşan gerilme aralıklarının sayısı yapılmıştır. Elde edilen sayım değerleri esas alınarak söz konusu üç köprü için toplam yorulma hasar birikimleri hesaplanmıştır. Benzer bir çalışma Marmaray Projesi kapsamında Yedikule köprüsü için oldukça detaylı olarak yapılmıştır.

Ulaşılan sonuçlar ve ileriki çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Test edilen elemanın metalurjik yapısı, bulunduğu yerdeki çevre şartları, işçilik, korozyon testlerden elde edilen sonuçların dağılık olmasına yol açmaktadır. Güvenilir bir istatistiki değerlendirme için test sayısı artırılmalıdır. Hangi kategoriye girdiği daha kesin olarak belirlenmelidir.

- Şu ana kadar elde edilmiş sonuçlar AASHTO kategori D (ECCS71) nin kullanılmasıyla daha az artık yorulma ömrünün elde edildiğini göstermektedir.

- Literatür incelendiğinde, hafif derecede korozyona maruz kalan, yumuşak çelikten (mild steel) perçinli olarak üretilmiş köprü taşıyıcı elemanlarının artık yorulma ömrünü belirlerken, AASHTO kategori D (ECCS 71) değerlerinin kullanılması makul bir yaklaşım sağladığı ifade edilmektedir.

- Sabit genlikli (constant amplitude) yorulma limitinin üzerinde, hafif derecede korozyona maruz kalmış wrought-iron perçinli köprü taşıyıcı elemanları ile, yumuşak çelik (mild steel) perçinli köprü taşıyıcı elemanlarının yorulma mukavemeti aynıdır.

- Büyük numune (full scale) test verisi incelenirse, wrought-iron perçinli köprü taşıyıcı elemanları için Hirt tarafından elde edilen sabit büyüklük yorulma limiti 70 N/mm² civarındadır. Öte yandan aynı limit için Out (1984) 45 N/mm² bulmuştur. Bu farkın nedeni Hirt tarafından, imalatla kullanılan yöntemlerin farklılığı ve işçilik ile izah edilmektedir. Kuzey Amerika'da delikler zımbalama yöntemiyle açılmakta bu da delik çevresinde artık gerilme oluşturmaktadır. Oysa Avrupa'da delikler matkap ile açılmaktadır.

Sabit genlikli (constant amplitude) yorulma limitinin aynı elde edilmemesinin bir diğer nedeni de malzemenin mikro yapısal farkıdır.

- Şu ana kadar elde edilen test sonuçlarının tamamı AASHTO Kat. C (ECCS 90) nin üzerindedir. Ancak kesin değerlendirilmeye henüz ulaşamadığından Ankara-İstanbul demiryolu hattındaki üç köprünün değerlendirilmesinde hem Kategori D, hem de Kategori C hesaba katılmıştır. Görüldüğü gibi bu da artık yorulma ömrü sonuçlarını oldukça etkilemektedir

- Ayrıca, verilen sonuçlardan da görüleceği üzere, darbe katsayısı, toplam yorulma hasar birikimini doğrudan ve oldukça önemli miktarda etkilemektedir. Bu da artık yorulma ömrüne tesir etmektedir. Dolayısı ile darbe katsayısının sağlıklı şekilde elde edilmesi bir zorunluluktur.

- Bünyesinde yorulma çatlağı olan elemanların onarımı, gerekiyorsa güçlendirilmesi, arazi şartlarına uygun hızlı ve güvenilir tekniklerin geliştirilmesine yönelik büyük numune deneyleri gerçekleştirilmelidir.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışmanın yapılmasında gerekli ekipmanların sağlanmasını temin eden NATO Science for Stability araştırma programına, TCDD Genel Müdürlüğü'ne, İTÜ Rektörlüğü'ne ve İTÜ İnşaat Fakültesi Dekanlığı'na, Haslab yorulma laboratuvarının kurulmasında çok büyük emeği geçen ve bu testlerin başlatılmasına öncü olan ve bize yol gösteren hocamız emekli Prof. Dr. Erdoğan Uzgider'e ve proje sırasında baş araştırmacılardan biri olan Ahmet Kutlu Şanlı' ya da teşekkürlerimizi sunarız.

Haydarpaşa'da bulunan yorulma laboratuvarımız TCDD ile imzalanan bir protokol çerçevesinde bu sene sonuna kadar İTÜ inşaat fakültesinde bulunan deprem laboratuvarına taşınacaktır. Bundan sonraki yorulma testlerine İstanbul Maslak da bulunan İTÜ kampüsünde devam ettirilecektir.

Bu çalışmaların sonucunda bir adet yüksek lisans tezi tamamlanmıştır (Kaya, 1997).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Highway Bridges, 1989- 2014 14th-17th Edition, Washington D.C.
 American Society for Testing and Materials, 1986, Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Vol.03.01, Philadelphia

- AREA, American Railway Engineering Association, Specifications for Steel Railway Bridges, 1991, Manual for Railway Engineering, Chapter 15, Washington D.C.
- AREMA Amerikan Demiryolu Mühendisleri Birliği, 1997
- Baker, K.A., Kulak, G.L., 1985, "Fatigue of Riveted Connections", Canadian J. Civil Engineering, Vol. 12
- Barsom, J.M. and Rolfe, S.T., 1987, Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice Hall Inc., Englewood cliffs, New Jersey
- BE Çelik Demiryol Köprüleri İçin Hesap Esasları 1960
- Brühwiler, E., Smith, I.F.C. and Hirt, M.A., 1988, "Fatigue and Fracture of Riveted Bridge Members", Journal of Structural Engineering, Vol. 116 No 1,
- COSMOS/M(386) Version 1.65, 1991, Finite Element System Software, Structural Research and Analysis Co., Santa Monica California USA
- Downing, S.D., Socie, D.F., 1982, "Simplified Rainflow Counting Algorithms", Int. J. Fatigue, Vol.4, No. 1, pp. 31-40.
- Fisher, J.W., Yen, B.T., Wang, D. 1989, "Fatigue of Bridge Structures", A Commentary and Guide for Design, Evaluation and Investigation of Cracking, ATLSS Report No. 89-02
- Fisher, J.W., Yen, B.T. and Wang, D. 1987, "Fatigue and Fracture Evaluation for Rating Riveted Bridges", National Cooperative Highway Research Program Report 302
- Kaya, H. 1997, Mevcut Çelik Demiryolu Köprülerinde Yorulma Ömrü Tayini, Yüksek Lisans tezi, ITU.
- Matlab Matrix Laboratory, 1992, High Performance Numeric Computation and Visualization Software, The Math Works Inc. Mass. USA
- Miner, M.A., 1945, "Cumulative Damage in Fatigue", J. Appl. Mech., Vol.12, Trans. ASME, Vol.67, pp.A159-A164,
- Out, J.M.M., Fisher, J.M., Yen, B.T., 1984, "Fatigue Strength of Weathered and Deteriorated Riveted Members", Fritz Engineering Laboratory Report 483-3C84
- Palmgren, A. 1924, "Durability of Ball Bearings", ZVDI, Vol.68, No.14, pp.339-341 (in German)
- Reemsnyder, H.S., 1975, "Fatigue Life Extension of Riveted Connections", ASCE J. Struct.Div. No.101, pp.2591.
- TCDD Genel Müdürlüğü İstatistik Yıllığı
- TCDD Genel Müdürlüğü, Tren Sefer ve Katar Bilgileri
- Uzgider, E., Şanlı, A.K., Piroğlu, F., Çağlayan, B.O., 1996, "General Report for the Bridge Tests Conducted in 1992, 1993 and 1994", TU-BRIDGES Research Project Report No 4.
- Uzgider, E., Gündüz, N., Aydoğan, M., Piroğlu, F., Çağlayan, B.O., Rahmatian, P., Ilıcalı, B., 1996, "Testing & Evaluation of Cambazkaya Railway Bridge", TU-BRIDGES Research Project Report No 6
- Uzgider, E., Şanlı, A.K., Piroğlu, F., Özgen, A., Çağlayan, B.O., Tektunalı, A.C., 1996, "Testing & Evaluation of Karacam Railway Bridge", TU-BRIDGES Research Project Report No 5
- Uzgider, E.A., Çağlayan, B. O., Kaya H., 2005, "Gerçek Boyutlu Çelik Köprü Elemanlarının Yorulma Testi ve Artık Yorulma Ömrü Tespiti", Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 436 2005/2
- Vorschriften für das Entwerfen der Brücken mit Eisernem Überbau auf den Prinzipischen Staatseisenbahnen vom 1 May 1903